

## 시험발파 및 계측 지침

최병희<sup>1)</sup>, 김남수<sup>2)</sup>

### 1. 서언

건설교통부는 2003년 도로건설 현장에서의 암발파로 발생하는 진동 및 소음으로 인한 민원의 예방과 경제성 있는 시공을 통한 예산 절감을 목적으로 암발파 설계 및 시험발파, 시공 등에 관한 사항을 정리하여 「암발파 설계 및 시험발파 잠정지침(안)」(건설교통부, 2003)(이하 잠정지침)으로 제정, 공포하였다. 이 지침은 건설교통부 산하의 지방국토관리청에서 시행하는 일반국도 건설공사구간 중 노천에서 시행되는 암발파 설계 및 시공에 적용하도록 한 잠정안으로서 발파진동을 토대로 발파공법을 제시한 것이 특징이다. 아울러 지난 몇 년간 국내의 여러 발파현장에 실제적으로 적용됨으로써 기본적인 발파설계나 시공 상의 효율성을 제고시켰으며, 제어발파의 설계나 공법변경, 환경피해의 저감 등의 측면에서도 큰 역할을 수행한 것으로 평가되고 있다.

이와 같은 잠정지침의 여러 조항들 가운데서도 시험발파 및 계측지침과 관련된 조항들을 살펴볼 때, 그 기본적인 방법 및 공정절차 등은 적절하고도 자세하게 기술되어 있지만 지난 3년간의 현장적용을 거치면서 대두된 몇 가지 문제점들이 있으며, 일부 누락된 기술적인 사항들도 있는 것으로 지적되고 있다. 이런 관점에서 본 논문에서는 잠정지침 내용 중 시험발파 및 계측지침과 관련하여 미비하다고 판단되는 사항들을 차례로 제시하여 수정보완하거나 개선안을 제시함으로써 최종지침의 수립이나 방향설정에 도움이 되고자 하였다.

### 2. 시험발파 공정흐름에 대한 개선안

잠정지침 III장 2절 2항에서 제시하고 있는 '시험발파 세부 절차'를 살펴보면 그림 1과 같다. 이 시험발파 세부절차는 잠정지침이 제시하는 시험발파 및 계측지침의 골격이 되는 부분으로서 매우 상세하게 공정내용을 기술하고 있다. 하지만 흐름도 상의 시험발파 세부절차 6단계 중 전3단계(그림 1의 점선내부)는 일반적인 시험발파 및 계측 과정에 비하여 볼 때 중요한 기술적인 절차를 지나치게 간략화하여 표현하고 있는 것으로 볼 수 있다. 예를 들어, 일반적으로 시험발파는 부근에 보안물건이 있는 곳에서 대부분 수행되므로 민원과 관련하여 중대한 문제가 될 수 있는 지반진동이나 발파소음에 대한 영향평가 작업은 매우 중

---

1) 한국지질자원연구원  
2) 전남대학교 겸임교수

요한 공정이라 할 수 있다. 따라서 이런 중요한 공정은 흐름도 상에서 별도의

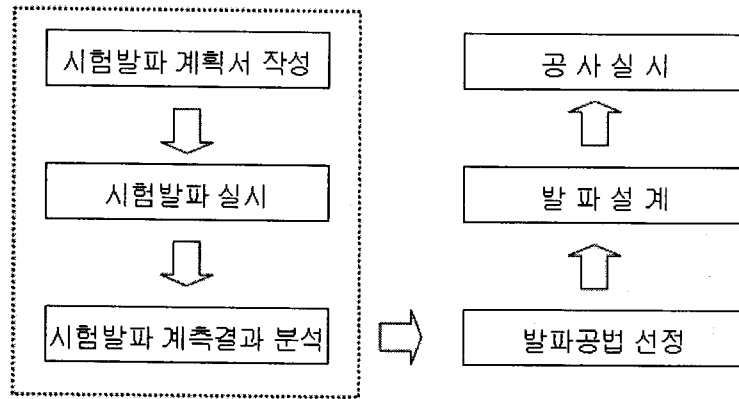


그림 1. 잠정지침의 시험발파 세부절차

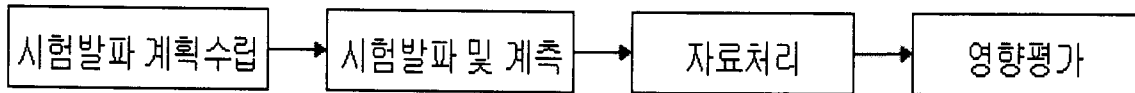


그림 2. 시험발파 및 계측에 대한 공정흐름도(안)

공정으로 분리시킴으로써 그 중요성을 부각시키고 기술적으로도 명확한 의미를 부여하도록 해야 할 것이다. 따라서 그림 1의 점선내부를 그림 2의 공정흐름도(안)과 같이 보다 세분화할 것을 제안한다.

이와 같이 시험발파 세부절차의 전3단계를 그림 2에 제시한 공정흐름도(안)로 변경하더라도 기존의 잠정지침에서 제시하고 있는 각 공정절차별 세부 수행내용들은 새로 만들어진 공정절차들에 각기 대응시켜 재배치만 하면 되므로 매우 효율적이다. 예를 들어, 잠정지침에서 '시험발파 계획서 작성' 공정의 세부 수행내용으로서 '허용수준 검토' 및 '발파영향권 검토' 항목은 이제 새로운 공정흐름상의 '영향평가' 공정 아래로도 옮겨져야 하는 것과 같다.

### 3. 시험발파의 규모에 관한 제안

잠정지침 상의 공정흐름에 따라 시공단계에 속하는 시험발파 공정에 들어가게 되면 진동이나 소음에 대한 영향평가 문제나 민원과 관련하여 중대한 문제가 될 수도 있는 시험발

파의 규모 문제가 대두된다. 즉, 잠정지침의 II장 3절에서는 「발파공사 시행 전에는 반드시 설계에 적용된 표준발파패턴 및 공법을 기준으로 하여 시험발파를 시행...」 하도록 규정하여 시험발파의 규모를 언급하고 있다. (물론, 잠정지침에서는 시험발파의 적용대상을 발파규모 별로 규정하여 일반발파와 대발파는 기본적으로는 시험발파 대상에서 제외하고 있지만 보안물건에 영향이 있다고 판단될 때는 일반발파나 대발파의 경우에도 모두 시험발파를 실시하도록 규정하고 있다.) 하지만 이 조항에서 규정하고 있는 표준발파패턴은 실시설계단계에서 '설계 발파진동추정식'을 근거로 구한 것으로서 당해 현장에서 진동 및 소음의 실측을 통해 구한 것이 아니기 때문에 적절한 시험발파 장소를 확보하기 어려운 현장에서는 시험발파의 규모가 증대한 이슈가 될 수 있다.

시험발파 설계패턴이 자료와 경험에 의한 추정으로 설계되기 때문에 시험발파 위치는 위험을 피하기 위하여 가급적 보안물건과 근접된 지점에서 실시하되 각종 시설물에 피해가 미치지 않는 범위 내에서 최대한 실시설계에 가까운 규모로 할 것을 제안한다. Dowding(1996)은 환산관계란 비슷한 자승근 환산거리( $D/W^{1/2}$ ) 보다는 비슷한 에너지(곧, 장약량  $W$ )와 거리( $D$ )로부터 유도될 때 가장 정밀한 것으로 보았지만 일반적으로 환산거리의 개념 자체가 바로 발파의 영향을 거리와 장약량의 2변수 함수로 보는 것이므로 대상지역에서 거리를 멀리할 수 없다면 보안물건에 영향을 미치지 않도록 가능한 한 장약량을 줄이는 것이 바람직하기 때문이다. 간혹 민원현장에서 민원인들이 장약량 규모를 본발파(표준발파패턴) 규모로 고집하는 경향이 있으나 이들을 설득해나가는 것은 국가와 발파기술자들의 몫이며, 이런 경우에도 장약량의 결정에는 여전히 협상의 여지가 있게 마련이다. 더욱이 지반진동이나 소음의 발생 및 전파특성에 영향을 미치는 요소들은 무수히 많기 때문에 실시설계 단계에서 이미 과장약 설계가 되었을 가능성도 높다. 따라서 민감한 곳에서는 가능한 장약량을 줄이고, 발파를 하기 전에 보안물건에 대한 균열조사를 하는 등 각별한 주의를 기울여야 할 것이다.

#### 4. 시험발파 세부절차에 관한 수정보완 사항

그림 3은 잠정지침 III장 2절 2항의 '시험발파 세부 절차'(그림 1 참조) 가운데 '시험발파 실시' 공정과 관련된 세부내용들이다. 이제 앞 절에서 언급한 시험발파의 규모문제를 고려하면 그림 3의 '①당초 설계패턴에 의한 천공, 장약 실시' 항목의 경우에는 단서조항으로서 보안물건에 근접한 곳에서는 설계패턴의 장약량을 최대한도로 하고 필요시 천공패턴을 변경할 수 있도록 하는 조항이 추가되어야 한다.

|  |   |
|--|---|
| <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">시험발파 실시</div> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· ①당초 설계패턴에 의한 천공, 장약 실시</li> <li>· ②주변 보안물건에 피해없는 안전한 곳에서 실시</li> <li>· 계측실시로 거리 및 장약량 변화에 따른 감쇠지수 파악</li> <li>· 신뢰성 있는 분석을 위해 30점 이상의 계측자료 확보</li> </ul> |
|--|---|

그림 3. 기존 잠정지침에서의 시험발파 실시 공정 및 세부 수행내용

그림 3의 '②주변 보안물건에 피해없는 안전한 곳에서 실시' 항목의 경우 전문가의 입장에서 '보안물건에 피해가 없는 안전한 곳'을 정성적으로 선택할 수 있겠지만 문제는 그런 안전한 곳을 임의로 선택하면 지반조건이 크게 달라질 수 있다는 문제가 발생한다. 따라서 이 항목의 경우에도 단서조항으로서 지반조건이 유사한 곳으로 한정하도록 하고, 만일 그러한 장소를 확보하기 어려운 경우에는 위에서와 같이 시험발파의 장약량 규모를 변경할 수 있도록 해야 할 것이다.

관련조항으로서 잠정지침 III장 2절 3항에는 시험발파의 위치선정과 관련하여 '각종 시설물에 피해가 미치지 않는 보안물건과 근접된 지점에서 실시'라는 조항이 있다. 일반적으로 보안물건과 근접된 지점에서 본발파(당초 실시설계패턴에 의한 발파) 규모로 시험발파를 하면 각종 시설물에 피해를 미칠 우려가 높다. 근본적으로, 시험발파를 하는 이유도 본발파가 각종 시설물에 영향을 미칠 것으로 예상되기 때문에 사전에 시험발파를 하여 그 영향정도를 미리 파악코자 하는 데 있으므로 시험발파의 규모는 가능한 본발파 규모 이하로 제한함으로써 안전을 도모하는 것이 옳바르다고 판단된다.

## 5. 자료처리에 관한 수정보완 사항

잠정지침 III장 2절 4항의 '시험발파 결과분석'에서는 발파진동 및 발파소음에 대한 회귀분석을 실시하되 분석방법으로서 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리 기법을 적용하도록 규정하고 있으며, 또 이들 회귀분석 결과로부터 전파 추정식을 산출하도록 규정하고 있다. 다시 말하면, 잠정지침에서는 「발파진동과 발파소음 각각에 대하여 자승근 환산거리 기법 및 삼승근 환산거리 기법을 적용하여 회귀분석을 실시하고, 이로부터 발파진동과 발파소음 각각에 대한 전파 추정식을 산출할 것」을 요구하고 있다. 하지만 동조항의 '①분석방법' 항목에서는 진동과 소음에 대한 언급이 분명하지 않으며, 어떠한 절차를 거쳐서 자승근 환산거리 기법과 삼승근 환산거리 기법의 우열을 가늠하여 발파진동과 발파소음의 전파 추정식들을 산출해야 하는 지에 대한 구체적인 언급이 없다. 덧붙여, 잠정지침 III장 2절 4항의 '①

분석방법' 항목에서는 신뢰도 95%로 분석하도록 규정하고 있으나 사실 국내외의 여러 연구자나 전문 S/W 등에서는 높은 진동수준에 주목하여 계측자료의 95%를 포함하는 선, 즉 90% 신뢰구간의 상한을 나타내는 식을 진동추정식으로 채택하고 있는 실정이어서 이에 대한 개념정립이 선행되어야 한다고 본다.

이런 맥락에서 본 논문에서는 발파진동 및 발파소음 계측자료에 대한 자료처리 방법으로서 발파진동 추정식과 발파소음 추정식을 유도하는 하나의 방법을 수정보완 사항으로서 요약하여 제시하였다.

### 5.1 발파진동 수준의 추정식

자료처리에 들어가기에 앞서 현장에서 측정된 자료는 반드시 다음 표 1과 같은 계측결과표에 기록해 둬으로써 발파진동이나 발파소음의 크기를 수치로써 쉽게 확인할 수 있도록 할 뿐만 아니라 이후의 자료처리 과정에서도 유용하게 사용할 수 있도록 한다.

표 1. 발파진동 및 발파소음 계측결과표 일례

| 발파 구분      | 폭원 거리 (m) | 지발당 장약량 (kg/delay) | V    |    | L    |     | T    |    | Vsum | 발파 소음 |     | 비고 |
|------------|-----------|--------------------|------|----|------|-----|------|----|------|-------|-----|----|
|            |           |                    | mm/s | Hz | mm/s | Hz  | mm/s | Hz |      | dB(L) | Hz  |    |
|            |           |                    |      |    |      |     |      |    | mm/s |       |     |    |
| XX 구간 시험발파 | 79        | 9.0                | 2.54 | 56 | 1.78 | 125 | 2.54 | 63 | 2.54 | 106   | NA  |    |
| XX 구간 시험발파 | 176       | 9.0                | 0.54 | 64 | 0.67 | 32  | 0.51 | 30 | 0.67 | 96    | 7.5 |    |

발파진동의 세기에 영향을 주는 변수들을 대별하면 i) 화약의 종류와 장약량, ii) 발파원에서 측정까지의 거리, iii) 암반의 역학적, 구조적 특성, iv) 천공패턴, 장약방법, 점화순서 등의 발파방법 등이며, 지역적인 특성과 발파조건에 따라서도 크기가 달라지므로 대상지역 별로 발파조건에 따라 지반진동을 실측하여 그 전파특성을 도출하여야 한다.

#### (1) 일반식

발파로 인한 지반진동의 수준을 예측할 수 있는 전파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 일반적으로 장약량 및 폭원까지의 거리를 주요 변수로 하여 다음 식과 같은 유형으로 표현할 수 있다(Dowding, 1996).

$$PPV = k D^a W^c \quad (1)$$

식에서,

최병희, 김남수

PPV = 최대진동속도(Peak Particle Velocity), cm/s 또는 mm/s,

D = 폭원거리, m

W = 지발당 최대장약량, kg/delay

k, a, c = 자유면 상태, 화약의 성질, 암질, 발파방법 등에 따르는 상수

(2) 환산거리를 이용한 식

위 일반식은 폭원거리를 장약량으로 환산한 형태로서 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$PPV = k \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^n \quad (2)$$

$$PPV = k \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^n \quad (3)$$

식에서,

n = 감쇠지수

k = 화약특성, 발파방법, 암반특성 등에 따라 결정되는 상수

폭원거리를 장약량의 자승근으로 환산한 형태의 것으로 미광무국(USBM)에 의해 최초로 제안된 식 (2)를 자승근 환산거리식(Siskind et al., 1980a)이라 하며, 차원해석에 의해 삼승근으로 환산한 형태의 식 (3)을 삼승근 환산거리식(Ambraseys & Hendron, 1968; Dowding, 1996)이라고 한다. 이들 환산거리를 이용한 식들은 log-log 좌표계 상에서는 직선

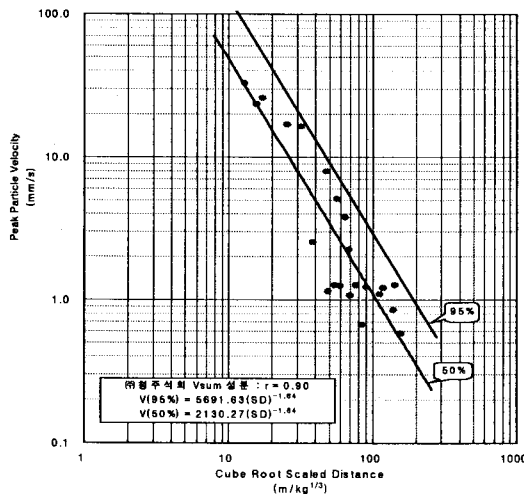


그림 4. 발파진동 계측자료 처리결과 일례: 벡터합 성분

으로 나타나므로 매우 실용적이다.

### (3) 진동수준 추정식

발파진동의 전파특성을 나타내는 추정식은 계측자료로부터 회귀분석을 통하여 각각의 상수를 구한 후 적합도가 높은 식을 선택하는 것이 일반적이다. 따라서 발파진동 계측자료를 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리 기법으로 처리하여 구한 전파식들 가운데 적합도가 높은 식을 진동추정식으로 채택하며, 발파진동의 세 성분(L, T, V 성분), LTV 성분전체 및 벡터합 성분에 대해 진동의 중위수준(50%)을 나타내는 식과 자료의 95%<sup>3)</sup>를 포함하는 식을 각각 도출한다. 그림 4는 발파진동 계측자료에 대한 처리결과 일례이다.

## 5.2 발파소음 수준의 추정식

미광무국의 연구결과(Siskind et al., 1980a)에 의하면 발파소음(발파풍)도 발파진동의 경우와 마찬가지로 다음 식과 같은 환산거리를 사용하여 예측이 가능하며, 삼승근 환산거리를 제안하였다.

$$P = k \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^n \quad (4)$$

위 식에서 발파소음  $P$ 는 psi, Pa과 같은 압력단위로 표시되는데, 예를 들어, psi 단위의 경우 사용되는 수치범위가  $1 \sim 10^6$  정도로 지나치게 넓어 50~170 dB 정도로 좁은 범위의 로그단위가 많이 사용된다. 즉, 식 (4)의 양변에 로그를 취하고 음압레벨(SPL)<sup>4)</sup>의 정의를 이용하면 다음 식이 유도된다.

$$SPL = A + B \log_{10} \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right) \quad (5)$$

3) 이 수치는 향후 개념정립이 요구됨. 이하 동일.

4) 발파풍(air blast) 또는 음압(sound pressure)의 수준은 다음 식으로 환산하는데, 이 식에 의한 음압레벨(Sound Pressure Level)은 dB(L) 단위(L: Linear)로 많이 표시되며 주파수에 대해 보정을 하지 않은 값으로서 구조물에 대한 영향평가에 많이 사용된다.

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

(SPL: dB(L), P: 발파풍압,  $P_0$ : 기준압(20  $\mu$ Pa))

환산거리에 따른 발파소음의 크기(dB(L) 단위)를 log-linear 좌표계 상에서 식 (5)에 적합시키면 계측자료를 가장 잘 표현하는 추정식을 구할 수 있어 환산거리에 따른 발파소음의 전과경향을 예측할 수 있다.

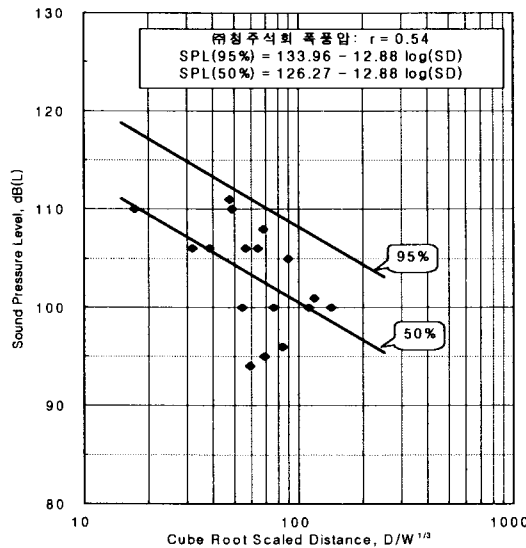


그림 5. 발파소음 계측자료 처리결과 일례

발파소음에 대한 추정식도 발파진동의 경우와 같이 삼승근 및 자승근 환산거리로 처리한 결과 중에서 적합도가 높은 쪽을 채택할 수 있다. 아울러 계측자료에 대해 발파풍압의 중위수준(50%)을 나타내는 식과 측정된 자료의 95%를 포함하는 식을 각각 도출한다. 그림 5는 발파소음 계측자료에 대한 처리결과 일례이다.

## 6. 발파진동 및 발파소음에 대한 영향평가식의 제안

앞 절에서 언급한 자료처리 공정을 수행하고 나면 대상지역에서의 발파진동 및 발파소음의 수준을 사전에 예측할 수 있는 진동추정식과 소음추정식을 얻게 된다. 이 추정식들은 대상지역에서 발파를 실시할 경우에 예상되는 진동 및 소음의 수준을 정량적으로 추측할 수 있게 해 주는 식으로서 발파진동의 세 성분(L, T, V), LTV 성분 전체 및 벡터합 성분 각각에 대하여 그 중위수준(50%)과 95% 수준을 예측할 수 있게 해 주며, 발파소음의 경우에도 그 중위수준과 95% 수준을 예측할 수 있게 해 준다. 그러면 어떤 현장에서 관심의 대상이



되는 보안물건에 대한 영향평가를 수행한다고 가정할 때 선행된 자료처리 과정에서 도출한 여러 가지 진동 및 소음 추정식들 가운데 어떤 것을 당해 현장에서의 진동 및 소음에 대한 영향평가식으로 사용해야 할 것인지를 결정해야 한다.

이와 관련하여 잠정지침을 살펴보면, III장 2절 4항의 '①분석방법' 항목에서 단순히 '신뢰도 95%'라고만 했을 뿐 발파진동의 경우 진동의 어떤 성분들(L, T, V, LTV 전체, 또는 벡터합 성분)에 대한 95% 수준을 말하는지 명확하지 않다. 또한, 통계적으로 진동이나 소음자료에 대한 회귀분석 결과의 대표치는 중위수준(50%)인데도 불구하고 영향평가식으로서 84%, 95% 또는 100% 수준 등의 상한에 대한 추정식이 사용되는 것은 측정자료의 산포(측정오차, 장비오차, 암질조건의 변화 등에 의한 자료의 산포) 때문에 안전율을 감안하였기 때문이다. 따라서 영향평가식의 결정은 어디까지나 발파전문가의 몫이라 할 수 있지만 본 논문에서는 국가의 지침 마련과 발파공해 저감의 측면에서 가장 엄격하고도 보수적인 수준으로 발파진동의 경우 진동의 벡터합 성분자료의 95%를 포함하는 진동추정식을 발파진동의 영향평가식으로 사용할 것을 제안하며, 발파소음의 경우에도 측정자료의 95%를 포함하는 소음추정식을 발파소음에 대한 영향평가식으로 사용할 것을 제안한다.

## 7. 결론

본 논문에서는 2003년도에 건설교통부가 제정, 공포한 「암발파 설계 및 시험발파 잠정지침(안)」이 시공현장에 실제 적용되면서 지적되어 온 문제점들 가운데 시험발파 및 계측 관련사항들을 고찰하고, 지침내용 중 기술적으로 미비하다고 판단되는 사항들에 대하여 수정 보완하거나 개선안을 제시함으로써 향후 최종지침의 수립에 도움이 되고자 하였다. 하지만 국내의 여러 도로건설 현장에서 나타나는 다양한 암질조건과 화약발파 특유의 불확실성, 주변 환경여건의 변화 등을 고려하였을 때 시험발파의 전체과정을 단순한 하나의 표준으로 묶어 버릴 수는 없을 것이다. 따라서 본 논문에서는 시험발파를 일정한 틀로 규격화하기 보다는 표준발파패턴의 범주 내에서 발파전문가가 현장여건에 따라 유연하게 시공할 수 있도록 하는 근간을 마련하는데 중점을 두었다.

### 참고문헌

1. 건설교통부, 2003, 암발파 설계 및 시험발파 잠정지침(안).
2. Ambraseys, N. R., and & Hendron, A. J., 1968, Dynamic Behavior of Rock Masses, Rock Mechanics in Engineering Practice (K. G. Staggs and O. C. Zienkiewicz, eds.), John Wiley & Sons, Inc., London, pp.203-227.
3. Dowding, C. H., 1996, Construction Vibrations, Prentice Hall, pp.45-51, pp.54-55.

최병희, 김남수

4. Siskind, D. E., M. S. Stagg, J. W. Kipp, and C. H. Dowding, 1980a, Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting, USBM RI 8507, pp.9-17.
5. Siskind, D. E., V. J. Stachura, M. S. Stagg, and J. W. Kopp, 1980b, Structure Response and Damage Produced by Airblast From Surface Mining, USBM RI 8485, p.111.